

浅谈蒸汽压缩机防喘振控制方式



作者简介：黄光明先生，工程师；主要研究方向：制浆造纸、锅炉汽机、制盐、化工及废水处理行业的自控仪表工程管理和调试。

黄光明 饶佳 钟志辉

(中国轻工业长沙工程有限公司, 湖南长沙, 410004)

摘要：在制盐及废水处理的蒸发结晶工艺系统（MVR）中，由于蒸汽压缩机工况区较窄，容易出现液击、频繁喘振、振动值超过极限导致跳车等状况。为解决这些问题，本文在DCS上通过控制蒸汽压缩机出口压力和温度、设置防喘振预警控制程序及喘振画面报警等措施，以及增加回流管线等方式，在蒸汽压缩机喘振情况出现时，DCS通过喘振预警程序及喘振报警画面等方式发出信号，当喘振信号出现时能自动开启喘振阀门，或以人工手动开启喘振阀门，避免了蒸汽压缩机液击和喘振等状况的出现。

关键词：蒸汽压缩机；喘振；性能曲线；预警；振动

中图分类号：TS736+.3 **文献标识码：**A **DOI:** 10.11980/j.issn.0254-508X.2020.04.009

Discussion on Anti Surge Control Mode of Steam Compressor

HUANG Guangming* RAO Jia ZHONG Zhihui

(China CEC Engineering Corporation, Changsha, Hu'nan Province, 410004)

(*E-mail: huangguangming@cecchina.com)

Abstract: In the evaporation crystallization process system (MVR) of salt production and wastewater treatment, due to the narrow working area of the steam compressor, it was easy to have problems of interlock protection and automatic control, such as liquid hammer, frequent surge, over large vibration value, etc. measures such as controlling the pressure and temperature at the outlet of the compressor, setting the anti surge early warning control program, surge screen alarm, and increasing the return pipeline were adopted on DCS. When compressor surge occurred, DCS could automatically open surge valve by means of surge warning program or manually open surge valve by means of surge alarm screen, so as to avoid compressor surge and liquid hammer.

Key words: compressor; surge; performance curve; warning; vibration

蒸汽压缩机是制盐或废水处理蒸发结晶系统（MVR）中的大型增压关键设备，作用是将低压或低温蒸汽加热升温，以达到工艺所需的压力和温度的要求。蒸汽压缩机整体主要由压缩系统、蒸汽系统、润滑系统和密封系统4个基本单元组成^[1-2]。蒸发器产生的蒸汽经过分离器去除蒸汽中的部分液体，然后再进入压缩机。由于蒸汽压缩机工况区较窄，容易出现液击、频繁喘振、振动值超过极限导致跳车等连锁保护和自动控制问题。为此，本文通过控制蒸汽压缩机出口压力和温度等工艺参数、设置防喘振预警控制程序及喘振画面报警等措施，以及增加回流管线等方式，在蒸汽压缩机喘振情况出现时，DCS通过喘振预警程序及喘振画面报警等方式提前发出喘振信号，当喘振信号出现时，能自动开启喘振阀门或手动开启喘振阀门，以避免蒸汽压缩机出现液击和喘振等现象。

1 蒸汽压缩机及其控制检测系统的基本组成

蒸汽压缩机主要由蒸汽压缩机本体、高压电机、润滑油齿轮箱、油加热器、油过滤器和油冷却器等组成。本文以浙江某硫酸铵二期项目（以下称本项目）为例，对蒸汽压缩机的控制回路、保护措施及检测点详细情况进行论述。本项目共有3台（两种不同类型）蒸汽压缩机，蒸汽压缩机入口流量分别为90 t/h、112 t/h、4 t/h，主要为MVR系统提供生产过程所需的蒸汽，蒸汽压缩机工艺流程图如图1所示。具体如下：

(1) 由蒸汽系统组成的回路控制。由入口蒸汽温度、出口蒸汽温度、入口蒸汽压力、出口蒸汽压力组成的控制检测回路。

收稿日期：2019-11-22（修改稿）

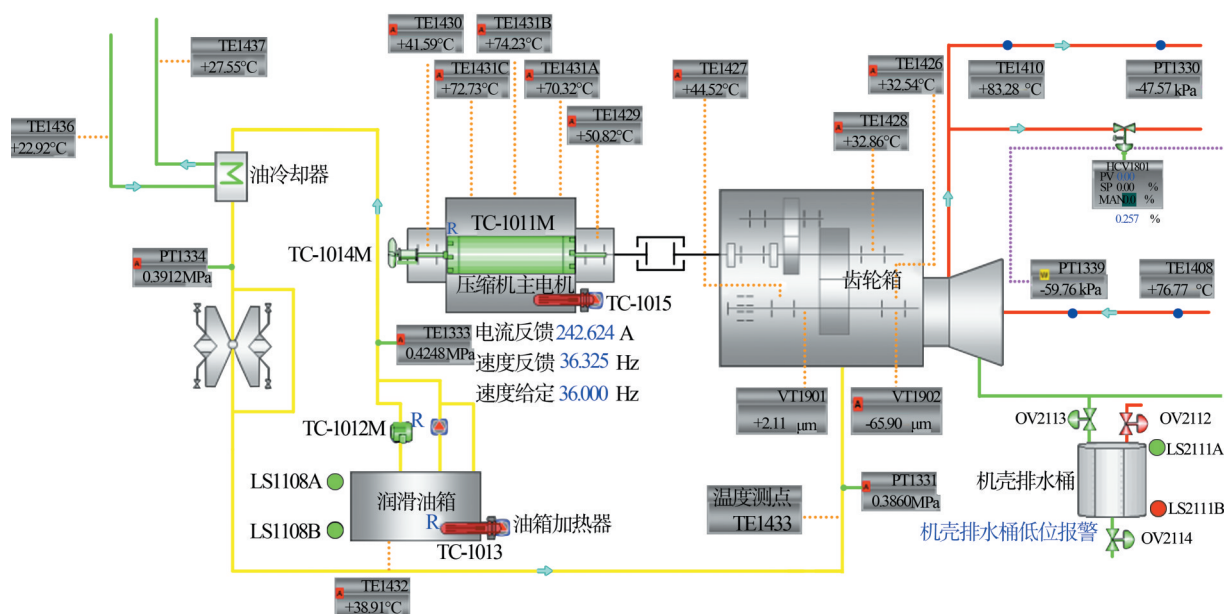


图1 蒸汽压缩机工艺流程图

(2) 由轴位移、轴振动和轴承温度等检测点组成的压缩机机械保护系统。

(3) 由压缩机润滑油压力开关、压力变送器和过滤器压差开关组成的防止润滑油压力过低, 损坏压缩机组的润滑油压力检测报警和连锁控制保护系统。

(4) 由压缩机油箱温度测点、供油温度测点、油加热器组成的润滑油油温检测和保护系统。

(5) 由回流管线上的防喘阀门(回流阀门)构成的防喘振控制回路及手动放空阀构成的降低出口管线压力缓解压缩机喘振的措施。

2 蒸汽压缩机喘振原因和控制方式

2.1 蒸汽压缩机防喘振方式

蒸汽压缩机在运行过程中, 当入口流量减少到极限流量时, 蒸汽压缩机就会产生喘振状况, 为了防止喘振状况发生, 通常有两种控制方式, 其一是打开排空阀门, 降低出口管道的压力, 缓解蒸汽压缩机喘振, 但并不能增加入口流量, 不能真正解决蒸汽压缩机喘振问题; 其二是打开回流管线上的防喘阀门, 使出口管道的蒸汽回流, 这样既可以降低管道的压力, 又可以增加蒸汽压缩机入口的流量; 既解决了喘振问题, 又避免了蒸汽的浪费。

2.2 两种方式结合的防喘振方式实例

本项目使用了两种方式结合的防喘振方式, 如图2所示。具体为: ①手动打开排空阀门, 将蒸汽放空, 降低出口压力, 避免了喘振带来的损坏; ②在回流管道上安装防喘振阀门, 目的是当蒸汽压缩机入口

流量接近喘振的最小流量时, 开启防喘阀门, 使流量回流, 增加入口流量, 从而可以防止蒸汽压缩机出现喘振状况。

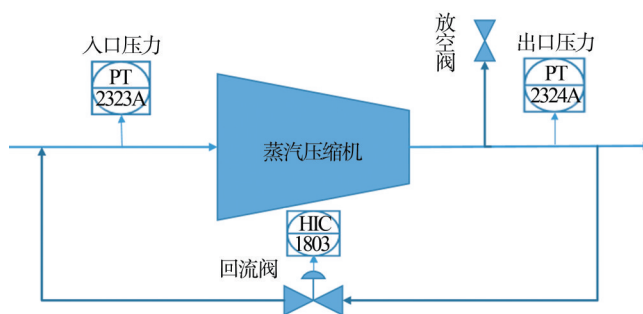


图2 本项目的防喘振方式

2.3 蒸汽压缩机性能曲线及防喘振自动控制

2.3.1 蒸汽压缩机性能曲线

(1) 蒸汽压缩机的性能曲线可形象地表示压缩机的特性, 见图3。图3中 P_d 为压缩机出口压力; P_s 为压缩机入口压力; q_v 为压缩机入口蒸汽流量。从图3可以看出, 在转速一定的情况下, 蒸汽压缩机的压力与流量成反比; 当流量达到某一点时, 蒸汽压缩机的效率最高, 当流量大于或者小于这一点时, 蒸汽压缩机效率下降, 一般将此点设计为工况点; 当蒸汽压缩机入口流量小于下限流量及喘振流量时, 蒸汽压缩机将会发生喘振; 当蒸汽压缩机入口流量大于上限流量时, 蒸汽压缩机会发生阻塞, 因此蒸汽压缩机正常开机状况下需要避开此工况。

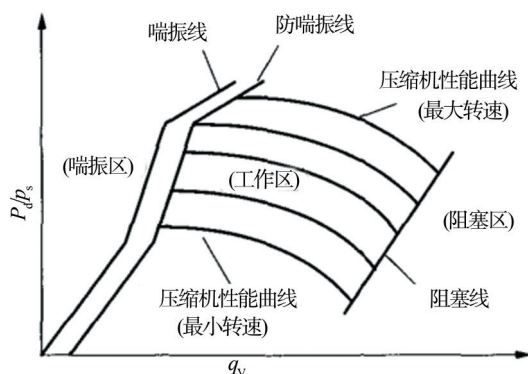


图3 蒸汽压缩机性能曲线示意图

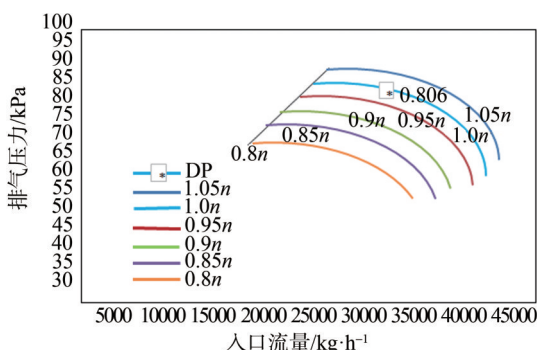


图4 本项目压缩机性能曲线

(2) 本项目蒸汽压缩机的性能曲线见图4。

2.3.2 使用防喘阀门及回流阀门防止喘振的原理和作用

图5为蒸汽压缩机防喘振过程示意图。图6为本项目蒸汽压缩机喘振时DCS报警画面。

从图5可以看出，当蒸汽压缩机在A点工作时，入口流量大于防喘振的最小流量，此时关闭防喘阀门；当蒸汽压缩机入口流量减小至安全流量B点时，此时开启防喘阀门；考虑到DCS控制系统和防喘阀门的响应时间和阀门开关的动作执行时间，当移到C点时，打开防喘阀门，此时蒸汽压缩机的入口流量逐渐增大，出口压力逐渐降低，当进入D点时，避免了蒸汽压缩机进入喘振区域，这是压缩机防喘振的基本原理。在本项目中，通过蒸汽压缩机的性能曲线，推算出防喘振计算公式。在不同转速下，用流量和压力的比值计算出喘振预警点，当比值小于这一值时，喘振程序判定蒸汽压缩机正常运行，DCS画面不报警，喘振阀门关闭；当比值大于这一值时，喘振程序判定蒸汽压缩机进入喘振区域，DCS画面报警提示操作人员进入喘振状态，需要注意开启防喘阀门，此时如果防喘阀门未开启，现场就会听到蒸汽压缩机的喘振声音，蒸汽压缩机进入喘振状况。

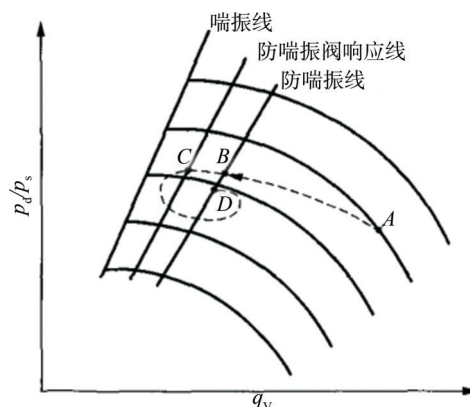


图5 蒸汽压缩机防喘振过程示意图



图6 蒸汽压缩机喘振时DCS报警画面

3 几种不同蒸汽压缩机控制程序和防喘振信号判断计算公式

在蒸汽压缩机程序中防喘振控制程序是核心，设计好蒸汽压缩机防喘振计算公式，是预防压缩机喘振的关键节点，在防喘振控制程序中有几个关键要素必须考虑：①安全下限值是压缩机防喘振控制的关键参数之一，是防喘阀门开关的重要依据。通常，可以采用固定极限流量和可变极限流量设置压缩机入口流量的安全下限值，如图7所示。图7中 P_d 为压缩机出口压力； P_s 为压缩机入口压力； q_v 为压缩机发生喘振时的最大入口流量； S_1 为针对防喘振线1的安全裕度值； S_2 为针对防喘振线2的安全裕度值。②蒸汽压缩机防喘振必须选用调节阀，且为弹簧开启的调节阀，调节阀阀体性能为线性阀体。另外，在正常情况下，DCS给出4 mA信号对应0开度，但防喘阀门需设置为4 mA信号对应100%开度。

3.1 蒸汽压缩机压力自动调节和防喘振控制程序

3.1.1 防喘振控制

当管网阻力波动或蒸汽压缩机流量调小时，会出现整个蒸汽压缩机管网周期性的震荡现象，压力和流

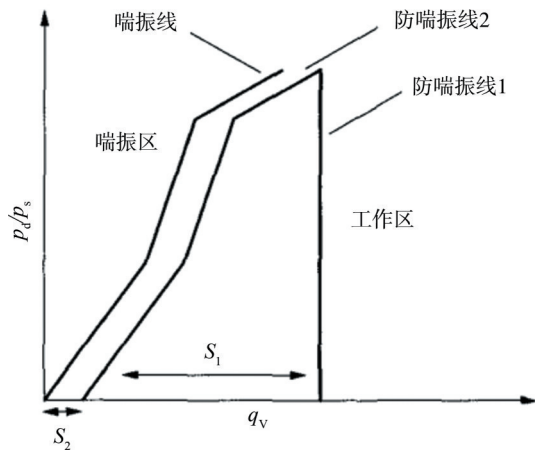


图7 固定极限流量和可变极限流量示意图

量都在发生脉动并发生异响噪音，即发生了喘振，整个机组会遭严重破坏，因此严禁蒸汽压缩机在喘振区域运行。为了防止喘振发生，本机组设有防喘振控制系统，要求控制系统在喘振发生时能自行开启放空阀门，消除系统喘振。防喘振控制回路主要由进出口压力变送器、调节器、放空调节阀门组成。

3.1.2 自动调节控制

蒸汽压缩机自动出口压力显示值与出口压力设定值有偏差时，自动调节蒸汽压缩机运行频率。DCS系统通过出口压力显示值和出口压力设定值进行比较，调节PID蒸汽压缩机的运行频率，当实际出口压力小于设定压力时，自动改变频率信号，将频率增大，自

动调节蒸汽压缩机的运行状况。

3.2 蒸汽压缩机开停机程序和逻辑连锁

3.2.1 蒸汽压缩机开机前准备工作

- (1) 确认油箱油位是否正常。
- (2) 润滑油油温是否大于15℃。
- (3) 润滑油泵是否开启，油压是否正常。
- (4) 防喘阀门是否全开启。
- (5) 轴承温度是否小于15℃。

待这些条件都需满足后，才能启动压缩机。

3.2.2 蒸汽压缩机停机前准备工作

- (1) 关闭主电机前首先开启防喘阀门。
- (2) 主油泵自动停机，辅助油泵自动启动。
- (3) 本项目压缩机逻辑连锁图见图8。

3.3 蒸汽压缩机防喘振计算公式和判定程序

本项目有两种不同类别的压缩机，即有两种不同的防喘振控制方式。一种是根据防喘振计算公式来组态防喘振判定程序，当计算结果在某一临界值时，防喘阀门自动开启，同时出现报警信号。另一种是无防喘振计算公式，只提供了蒸汽压缩机的特性曲线，要想实现防喘振自动控制，必须根据蒸汽压缩机特性曲线来推导出防喘振判定程序，以此实现防喘阀门的自动控制。当喘振信号出现时，DCS画面出现红色闪烁的报警信号，给操作人员以提示。

3.3.1 防喘振控制方式一

防喘振控制方式一是利用防喘振计算公式组态的

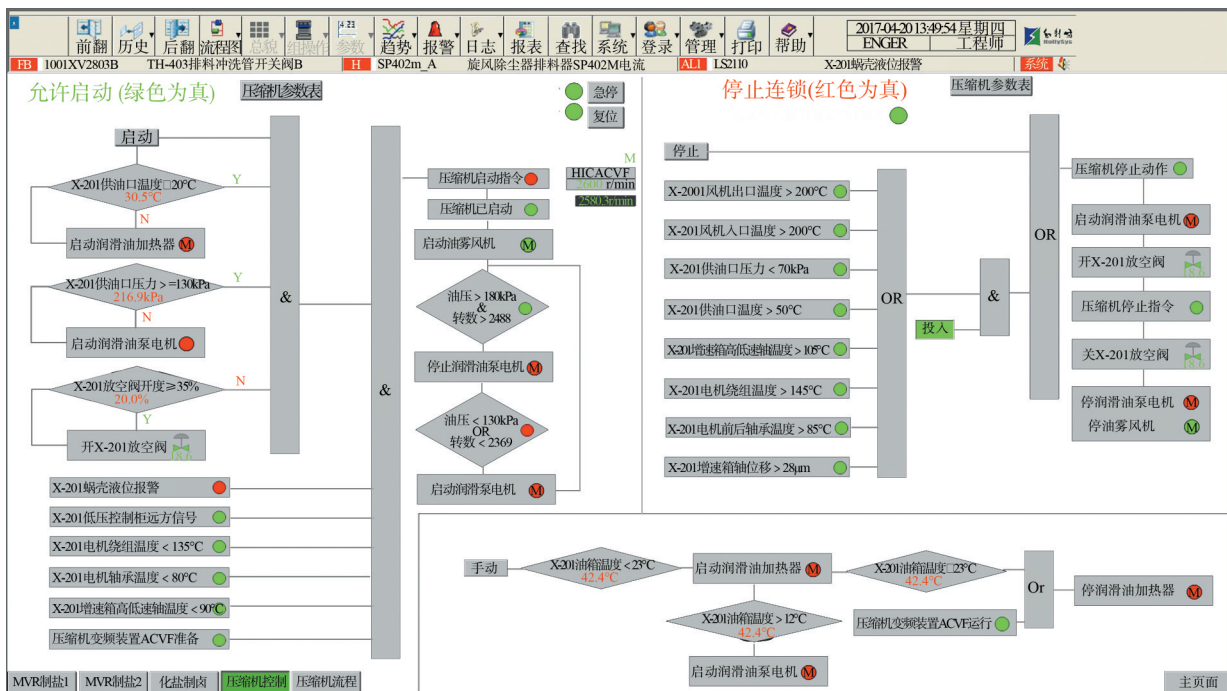


图8 本项目蒸汽压缩机的逻辑连锁图

喘振判定程序, 见表1。

3.3.2 防喘振控制方式二

防喘振控制方式二是利用特性曲线推导出防喘振的判定程序。

利用额定转速不同, 进行分段计算; 利用压力和流量确定防喘振边界线, 确定边界线的斜率为 K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 , 并将其与正常运行工况的斜率进行比较。当边界线的斜率大于正常工况斜率, 判断为喘振; 边界线的斜率小于正常工况斜率, 为正常(未喘振)。

(1) 蒸汽压缩机喘振判断: 根据厂商提供的性能曲线推出计算公式为: 出口压力/出口流量 $=K_0$ 。

(2) 当蒸汽压缩机实际转速小于额定转速的0.8倍时, 出口压力/出口流量 $\geq 0.95K_0$, 则判断进入喘振区域, 防喘阀门自动开启。

(3) 当蒸汽压缩机实际转速大于额定转速的0.8倍, 小于额定转速的0.85倍时, 出口压力/出口流量 $\geq 0.95K_1$, 则判断进入喘振区域, 防喘阀门自动开启。

(4) 当蒸汽压缩机实际转速大于额定转速的0.85倍, 小于额定转速的0.9倍时, 出口压力/出口流量 $\geq 0.95K_2$, 则判断进入喘振区域, 防喘阀门自动开启。

(5) 当蒸汽压缩机实际转速大于额定转速的0.9

倍, 小于额定转速的0.95倍时, 出口压力/出口流量 $\geq 0.95K_3$, 则判断进入喘振区域, 防喘阀门自动开启。

(6) 当蒸汽压缩机实际转速大于额定转速的0.95倍, 小于额定转速的1.0倍时, 出口压力/出口流量 $\geq 0.95K_4$, 则判断进入喘振区域, 防喘阀门自动开启。

(7) 当蒸汽压缩机实际转速大于额定转速的1.0倍, 小于额定转速的1.05倍时, 出口压力/出口流量 $\geq 0.95K_5$, 则判断进入喘振区域, 防喘阀门自动开启。

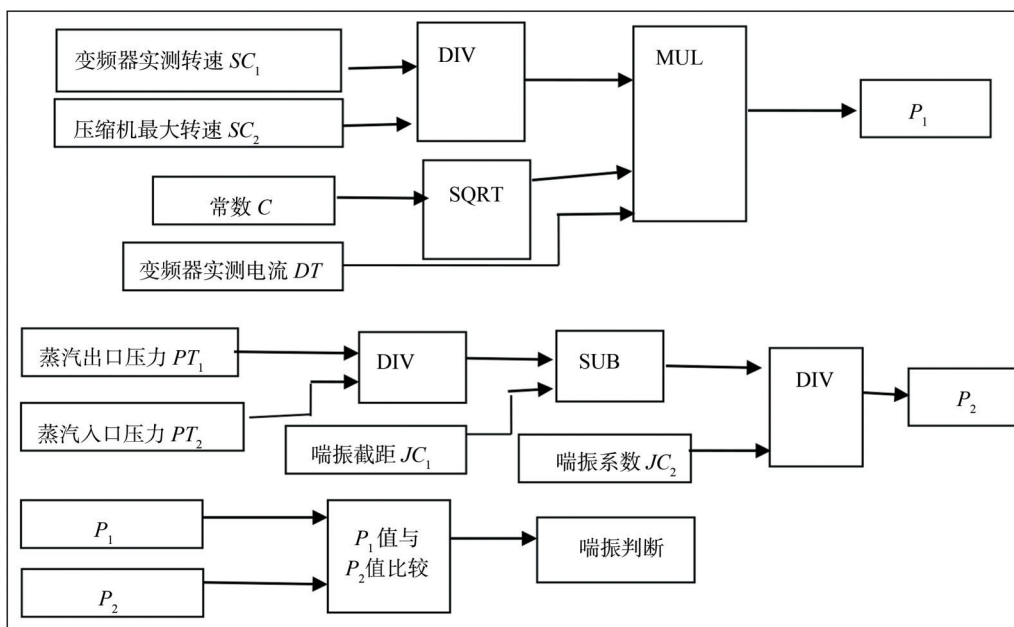
3.4 蒸汽压缩机防喘振报警画面

为使操作人员不依靠耳朵听压缩机喘振时发出的噪音来判断是否已发生喘振, 在操作画面上进行报警设置, 蒸汽压缩机防喘振报警画面见图9。通过计算 P_1 与 P_2 值进行比较, 当 $P_1 < P_2$ 时, 通过计算判断出蒸汽压缩机出现喘振报警, DCS出现红色闪烁报警画面, 同时出现红色闪烁字体“压缩机进入喘振区域, 请打开防喘阀门”, 给操作人员提示, 起到预警作用。通过设置喘振预警, 在喘振发生前, 操作人员提前开启防喘阀门或将防喘阀门打到自动模式(自动开启), 避免了因工艺参数变化引起的压缩机喘振, 起到了预警作用。

以上实例说明, 若使蒸汽压缩机的控制稳定, 防喘振预警系统很重要。本项目调试过程中, 在3台蒸

表1 防喘振控制方式一

P_1 (喘振判断系数1)	P_2 (喘振判断系数2)	喘振判断
$P_1 = \frac{SC_1}{SC_2} \cdot DT \cdot \sqrt{C} \times 9$	$P_2 = \frac{PT_1/PT_2 + JC_1}{JC_2}$	$P_1 < P_2$ 为喘振 $P_1 > P_2$ 为未喘振
式中, SC_1 为压缩机变频装置实时速度, SC_2 为压缩机变频装置最大速度, DT 为压缩机变频电流, 常数 C 为参数	式中, PT_1 为蒸汽出口压力, PT_2 为蒸汽入口压力, JC_1 为喘振截距, JC_2 为喘振系数	



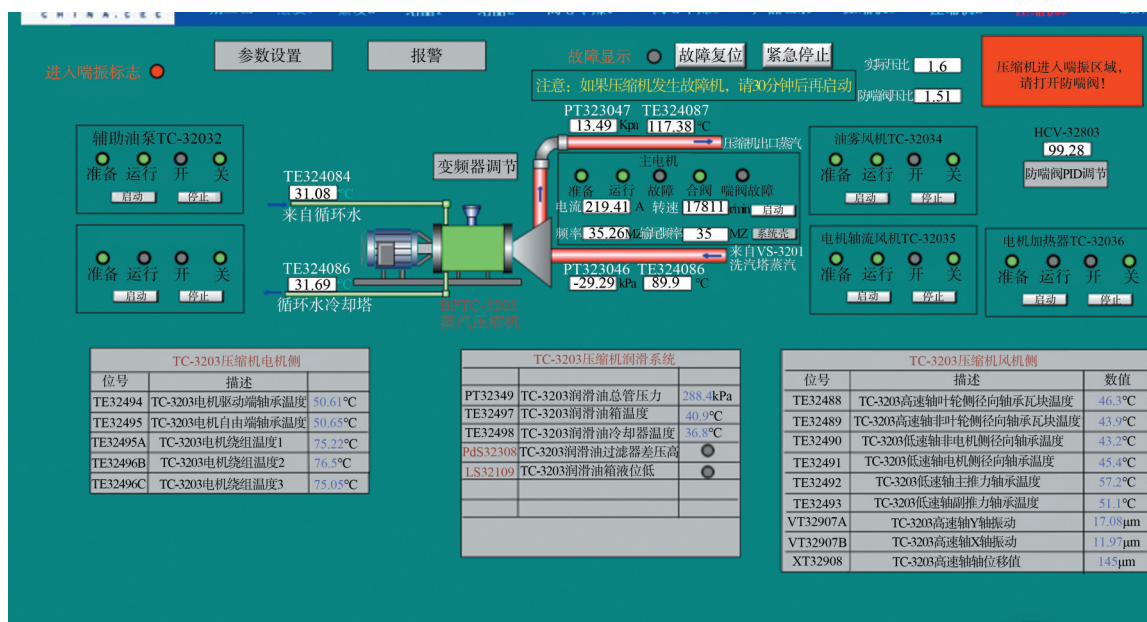


图9 蒸汽压缩机防喘振报警画面

汽压缩机中的1台压缩机未提供防喘公式和控制逻辑的情况下,通过蒸汽压缩机性能曲线推导出防喘控制程序和预警公式,达到了提前预警和稳定控制蒸汽压缩机的目的。

4 结论

在DCS上通过控制蒸汽压缩机出口压力、温度,设置防喘振预警控制程序及喘振画面报警等措施,以及增加回流管线等方式,在压缩机喘振出现时,DCS通过喘振预警程序及喘振报警画面等方式发出信号,当喘振信号出现时能自动开启喘振阀,或者手动开启喘振阀等方式,避免了压缩机喘振和液击等

情况的出现。实践证明,该方法达到了提前预警和压缩机控制稳定的目的。

参考文献

- [1] Cai Cuiping. Steam Compressor Control Optimization Scheme [J]. Petrochemical Automation, 2017(4):23.
蔡翠平. 蒸汽压缩机控制优化方案[J]. 石油化工自动化, 2017(4):23.
- [2] Zhang Nan. Dong Shijian. Study on Anti Surge Strategy of Centrifugal Compressor[J]. Liaoning Chemical Industry, 2012(4):407.
张楠,董世建. 离心式压缩机防喘策略研究[J]. 辽宁化工, 2012(4):407. [CPP]

(责任编辑:常青)

· 消息 ·

《中国造纸》2019年度“博世科杯”优秀论文评选活动正在进行

《中国造纸》作为我国造纸行业权威性的科技期刊,多年来得到了业内人士的厚爱与支持。一年一度的优秀论文评选活动已经成为《中国造纸》的年度盛典!得到了更多人士的关注与支持。为鼓励广大造纸工作者的创作热情,促进《中国造纸》的稿件质量不断提高,巩固和提高《中国造纸》的办刊水平及造纸科技论文的质量,本刊将继续举办2019年度优秀论文评选活动。本次评选活动由广西博世科环保科技股份有限公司赞助。

目前《中国造纸》2019年度优秀论文评选工作正在进行。本次优秀论文评选仍坚持创新与实用、理论与实践相结合的原则。为使评选活动有更广泛的群众基础和更能反映当前我国造纸行业科研成果、生

产技术创新及应用的情况,邀请中国造纸杂志社编委会委员和优秀论文评选委员会成员参加初选,同时广大读者、作者也可以对自己认为好的论文提出推荐理由进行推荐(发送至cpp2108@vip.163.com。邮件发送主题为:“优秀论文评选”)。最后由我国造纸行业及相关领域的知名专家、教授组成的评审委员会评选出优秀论文20篇,将在《中国造纸》上公开表彰并给予奖励。为了鼓励造纸生产一线的科技工作者积极投稿,本次评选仍将生产实践栏目的论文列入评选范围。

评选结果将刊于《中国造纸》杂志上,并同时在中国造纸杂志社网站及中国造纸杂志社官方微信上公布,敬请广大作者、读者关注。